

FISURACIÓN DE VIGUETAS PRETENSADAS

B. Tork, J.C. Gálvez, J. Planas y M. Elices
 Departamento de Ciencia de Materiales
 E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
 Universidad Politécnica de Madrid, 28040 MADRID.

Resumen. Durante el proceso de transferencia de la fuerza de pretensado en viguetas pretensadas con cuantía de armadura activa elevada, constituida por alambres grafilados, puede producirse la fisuración longitudinal del hormigón en la *zona de transmisión*. Este trabajo presenta un ensayo que permite medir las variables que gobiernan la adherencia entre el hormigón y el alambre pretensado y relacionarlas con el proceso de rotura del hormigón al realizar la transferencia de la fuerza de pretensado. Se han ensayado 27 probetas, combinando 3 profundidades de grafila y 3 recubrimientos. Los resultados muestran que una mayor profundidad de grafila mejora la adherencia siempre que no se produzca la fisuración longitudinal del recubrimiento. Sin embargo, en las probetas en las que se produce el agrietamiento longitudinal, la carga crítica que provoca este agrietamiento longitudinal es menor cuanto mayor es la profundidad de grafila. Además, una mayor profundidad de grafila aumenta la apertura de la grieta, con lo que disminuye la adherencia y aumenta la longitud de transmisión.

Abstract. The transmission length in prestressed beams depends on the concrete-steel bond and on the splitting action of the indented wire. This paper shows a novel testing procedure to evaluate the concrete-steel bond and its relation with the splitting action of the pretensioned indented wire. 27 specimens, combining 3 covers and 3 indentation depths, have been tested. The deeper the indentation the best the concrete-steel bond, if no cracking occurs. However, if indentation splitting cracks appear, deeper indentations require a lower splitting load. Moreover, deeper indentations lead to wider crack opening, minor bond stress and longer transmission length.

1. INTRODUCCIÓN

La adherencia entre la armadura activa y el hormigón es indispensable para transmitir la fuerza de pretensado al hormigón. Las viguetas se suelen fabricar en mesas sobre las que pretensan los alambres, hormigonando a continuación. Con el hormigón endurecido, se procede a transferir la fuerza de pretensado mediante el corte de los alambres [1]. Se denomina *longitud de transmisión* a la distancia entre el extremo libre y la sección en la que la armadura ha transmitido completamente, por adherencia, la fuerza de pretensado al hormigón. La longitud de transmisión es difícil de evaluar: actualmente se calcula con fórmulas empíricas [1-3], basadas en ensayos realizados hace años [4-6]. Además, en piezas con cuantía de armadura activa elevada, son frecuentes los problemas de fisuración longitudinal debidos al efecto de cuña que provoca la armadura en el hormigón (Figura 1). Este problema es aún más peligroso cuando la grieta existe y no se aprecia a simple vista.

La adherencia es favorecida por un doble fenómeno: 1) al transferir la fuerza de pretensado, el alambre aumenta

su diámetro por efecto Poisson y 2) al intentar deslizar el alambre, la grafila provoca la compresión del hormigón en la dirección radial [7]. Este efecto combinado, beneficioso para la adherencia, provoca un anillo de tracciones circunferenciales en el hormigón que aumenta el efecto de cuña de la armadura, pudiendo rasgar el hormigón longitudinalmente, en la dirección de la armadura (Figura 2).

En el estudio de la longitud de transmisión debe contemplarse el posible agrietamiento longitudinal del hormigón y su influencia en la adherencia entre el alambre y el hormigón. En este trabajo se presenta un ensayo que permite medir las variables que gobiernan la

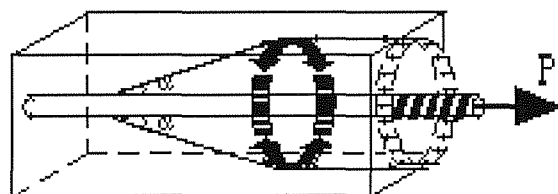


Figura 1. Anillo de tracción creado por el alambre [7].

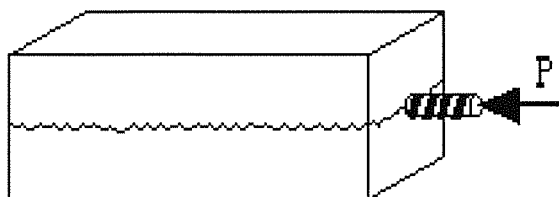


Figura 2. Agrietamiento longitudinal del hormigón.

adherencia entre el hormigón y el alambre pretensado y relacionarlas con el proceso de agrietamiento del hormigón al realizar la transferencia de la fuerza de pretensado. Los ensayos se han realizado con tres profundidades de grafila y tres recubrimientos distintos. A nuestro entender, los resultados son novedosos y aportan datos experimentales inexistentes que permiten relacionar el proceso de rotura del hormigón con la adherencia entre el alambre y el hormigón.

2. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL Y DE LAS PROBETAS

Se confeccionaron 27 probetas prismáticas de hormigón con el alambre pretensado coincidente con el eje longitudinal de la probeta. Todas ellas de 400 mm de longitud y 60 mm de anchura, pero de tres recubrimientos distintos (1.25ϕ , 2.25ϕ y 3.25ϕ). Se empleó alambre de pretensar de 4 mm de diámetro, con tres profundidades de grafila (Tabla 1). La geometría y las dimensiones de las probetas se detallan en la Figura 3 y las propiedades mecánicas del acero y del hormigón en la Tabla 2.

El alambre fue pretensado con una carga de 17 kN en un bastidor de acero en posición vertical. Para pretensar el alambre se empleó una máquina de ensayos servocontrolada. El alambre se unió al bastidor mediante dos anclajes de casquillo y cuña. El anclaje inferior estaba fijado al bastidor, mientras que el superior quedaba anclado a una pieza roscada exteriormente desplazable paralelamente al eje del bastidor (Figura 4). La fuerza de pretensado se aplicó de forma monótona creciente mediante el desplazamiento hacia abajo del pistón de la máquina. El control de la carga aplicada se hizo con la célula de carga. Una vez alcanzada la carga de pretensado se fijó el anclaje superior. A continuación se descargó la máquina, transfiriendo la fuerza de pretensado al bastidor, y se

Tabla 1. Profundidad de la grafila

Denominación	Profundidad de la grafila (mm)
Grafila ligera	0.01-0.02
Grafila mediana	0.04-0.06
Grafila profunda	0.10-0.11

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los materiales

Hormigón	Acero de pretensar
$E = 24 \text{ GPa}$	$E = 226 \text{ GPa}$
$f_{ck} = 29 \text{ MPa}$	$\sigma_{0.2} = 1755 \text{ Mpa}$
$f_{ct} = 2.5 \text{ MPa}$	$\sigma_u = 1935 \text{ Mpa}$
$G_F = 96 \text{ N/m}$	$\epsilon_u = 5.25 \%$

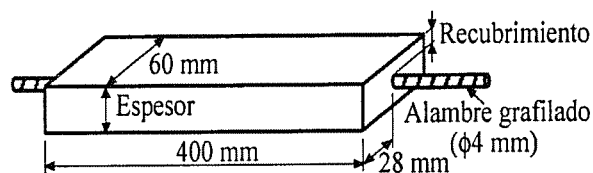


Figura 3. Geometría y dimensiones de las probetas.

retiró el bastidor de la máquina de ensayos. La tensión final de pretensado en el alambre fue conocida y controlada mediante un extensómetro resistivo unido a la zona central del alambre pretensado.

Una vez pretensado el alambre se hormigonaron las probetas en moldes metálicos con las caras interiores rectificadas. Los moldes se unieron al bastidor mediante un dispositivo con tornillos que permitía alinear y centrar el alambre pretensado con el molde, y mantener el fondo del molde en posición horizontal durante todo el proceso de hormigonado, vibrado y curado de las probetas.

La Ref^a [8] presenta los detalles sobre el bastidor y el procedimiento de confección de las probetas.

3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

El ensayo de las probetas se realizó en dos fases consecutivas. La primera consistió en transmitir la fuerza de pretensado del bastidor a la máquina de ensayos. La segunda en transferir, de forma controlada, la fuerza de pretensado de la máquina de ensayos al hormigón.

Al iniciarse la primera fase el alambre estaba pretensado, el bastidor comprimido y el prisma de hormigón sin tensiones. Se colocó el bastidor en la máquina de ensayos, se atornilló la placa inferior del bastidor al pistón de la máquina y el anclaje superior del mismo modo que al tesar el alambre. La Figura 4 muestra un esquema del dispositivo con la probeta durante el ensayo. Se desplazó el pistón de la máquina de ensayos a razón de 0.1 mm/min hasta alcanzar la carga de pretensado (17 kN). En este instante toda la carga había sido transferida a la máquina de ensayos, y la tensión en el prisma de hormigón y en el bastidor era nula.

A partir de ese momento se inició la transferencia de la fuerza de pretensado al prisma de hormigón. Para ello se desplazó el pistón de la máquina de ensayos hacia arriba, a una velocidad de 0.3 mm/min. A medida que el pistón subía se descargaban los extremos del alambre pretensado, transmitiendo su fuerza al prisma de hormigón. El ensayo finalizó una vez que los extremos libres del alambre quedaron descargados.

Las variables registradas durante el ensayo fueron:

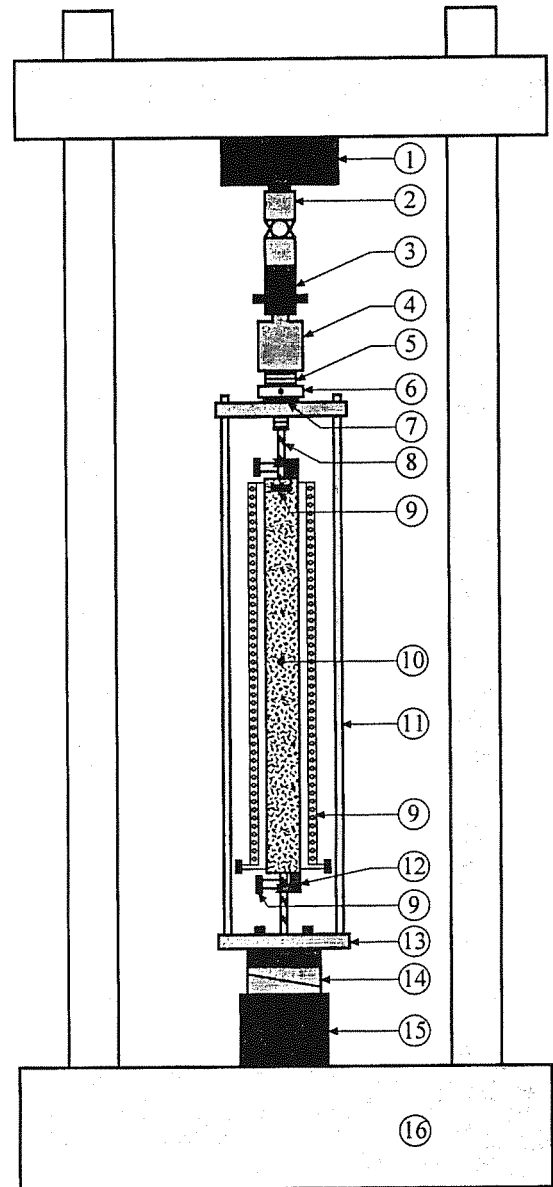
- Carga P aplicada por la máquina de ensayos.
- Desplazamiento del pistón de la máquina.
- Acortamiento longitudinal del prisma de hormigón, con una base de medida de 387.5 mm. Se midió en dos caras opuestas, obteniéndose el promedio.
- Deslizamiento relativo del alambre pretensado respecto a las caras superior e inferior del prisma de hormigón. Se midió el movimiento relativo de la sección del alambre situado inicialmente en el plano de la cara.
- Apertura de la grieta longitudinal en la cara superior del prisma de hormigón. Se midió en los dos lados opuestos, correspondientes al menor recubrimiento del alambre pretensado.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

Las Figuras 5a, 5b y 5c muestran los registros experimentales de la carga transferida al hormigón frente al acortamiento longitudinal de la probeta, para los alambres de grafila ligera, mediana y profunda respectivamente, y las probetas con recubrimiento 5, 9 y 13 mm. En las probetas de menor recubrimiento, 5 mm, se aprecia claramente un punto a partir del cual disminuye el acortamiento longitudinal de la probeta al destesar el alambre pretensado. Este punto corresponde a la iniciación de la grieta longitudinal en el prisma de hormigón. La propagación de la grieta longitudinal disminuye la transmisión de tensiones de rozamiento entre el alambre y el hormigón, por lo que se libera parte de la compresión del hormigón y disminuye su acortamiento longitudinal, como se observa en los registros experimentales. En las probetas con recubrimientos mayores, 9 y 13 mm, no se aprecia este fenómeno.

La Figura 6 compara los registros experimentales de la carga transferida al hormigón frente al acortamiento longitudinal de la probeta, en las probetas con el menor recubrimiento, 5 mm, para las tres profundidades de grafila. Se observa que cuanto más profunda es la grafila menor es la carga que corresponde al agrietamiento longitudinal de la probeta. Este resultado sugiere que una mayor profundidad de grafila provoca un anillo de tensiones radiales más intenso debido al

apoyo de la grafila sobre el hormigón. Los valores experimentales medios de la carga de rotura son aproximadamente 15, 13 y 12.5 kN para las grafilas ligera, mediana y profunda, respectivamente. Además, se puede observar que, antes de producirse la grieta longitudinal, a igualdad de carga transferida, cuanto mayor es la profundidad de la grafila mayor es el



- | | |
|----------------------|------------------------|
| 1. Célula de carga | 9. Extensómetro |
| 2. Rótula | 10. Probeta |
| 3. Unión con pasador | 11. Bastidor de tesar |
| 4. Copa roscada | 12. Soporte de extens. |
| 5. Anclaje superior | 13. Base del bastidor |
| 6. Tuerca | 14. Cuñas |
| 7. Separador en "U" | 15. Pistón de máquina |
| 8. Alambre grafilado | 16. Marco de máquina |

Figura 4. Esquema del dispositivo de ensayo con la probeta de hormigón pretensado en el bastidor unido a la máquina de ensayos.

acortamiento longitudinal del prisma de hormigón. Este resultado está en consonancia con que una mayor profundidad de grafila conduce a una mejor adherencia entre el alambre y el hormigón, disminuye la longitud de transferencia y aumenta el acortamiento longitudinal de la probeta.

La Figura 7 muestra los registros experimentales de la carga transferida al hormigón frente a la apertura de la grieta longitudinal del prisma de hormigón, medida en la cara superior de la probeta, en las probetas con recubrimiento de 5 mm, para las tres profundidades de grafila. Se puede observar como en cada curva hay un claro punto de quiebro que corresponde a la apertura de la grieta longitudinal, manifestado en un rápido crecimiento de la lectura del extensómetro. La carga correspondiente a la iniciación de la grieta coincide, lógicamente, con el punto de quiebro observado en las Figuras 5a, 5b, 5c y 6 y confirma la interpretación hecha al comentar dichas figuras.

Las Figuras 8a, 8b y 8c muestran los registros experimentales de la carga transferida al hormigón frente a la penetración del alambre medida en la cara superior de la probeta, correspondientes a las probetas con alambres de grafila ligera, mediana y profunda, respectivamente, y recubrimientos 5, 9 y 13 mm. En las probetas con recubrimiento 5 mm y alambres de grafila mediana y profunda se observa un cambio brusco de la pendiente de las curvas, que corresponde a la carga de propagación de la grieta longitudinal. Este resultado complementa los comentados hasta ahora para esas probetas, pues la iniciación de la grieta longitudinal provoca un aumento del deslizamiento relativo entre el alambre y el hormigón, produciéndose una mayor penetración del alambre en las caras superior e inferior de la probeta. El cambio de pendiente no es tan brusco en las probetas con recubrimiento 5 mm y alambre de grafila ligera debido a que la apertura de la grieta longitudinal es menor en estas probetas, como puede observarse en la Figura 7.

A igualdad de profundidad de grafila, un mayor recubrimiento conduce a una penetración mayor del alambre. Este fenómeno, aparentemente extraño, se ha verificado con un nuevo conjunto de ensayos, no incluido en esta publicación, que ha confirmado los resultados aquí presentados. Puede deberse a que las probetas con menor recubrimiento tienen un mayor estado de compresión y confinan más el alambre por efecto Poisson.

La Figura 9 muestra los registros experimentales de la carga transferida al hormigón frente a la penetración del alambre medido en la cara superior de la probeta, correspondientes a las probetas con recubrimiento de 13 mm y alambres de grafila ligera, mediana y profunda. Se observa como una mayor profundidad de grafila conduce a una menor penetración del alambre, lo que

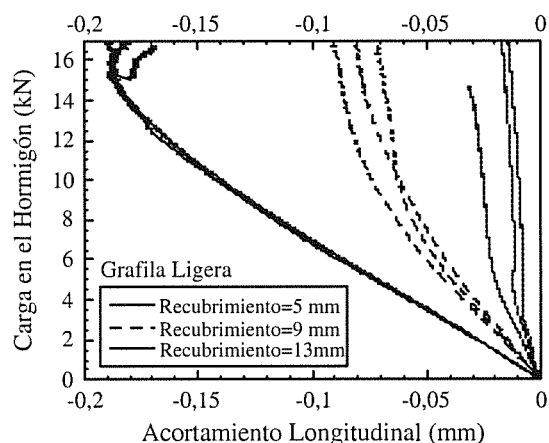


Figura 5a. Curvas experimentales de la carga transferida al hormigón frente al acortamiento longitudinal de la probeta, en probetas con alambre de grafila ligera.

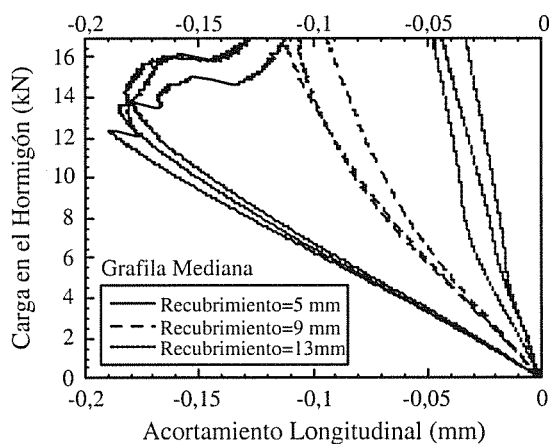


Figura 5b. Curvas experimentales de la carga transferida al hormigón frente al acortamiento longitudinal de la probeta, en probetas con alambre de grafila mediana.

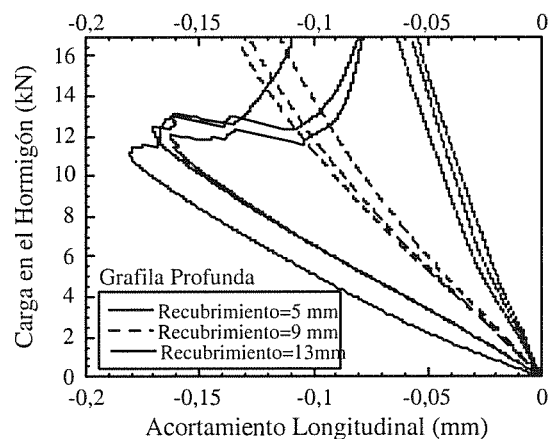


Figura 5c. Curvas experimentales de la carga transferida al hormigón frente al acortamiento longitudinal de la probeta, en probetas con alambre de grafila profunda.

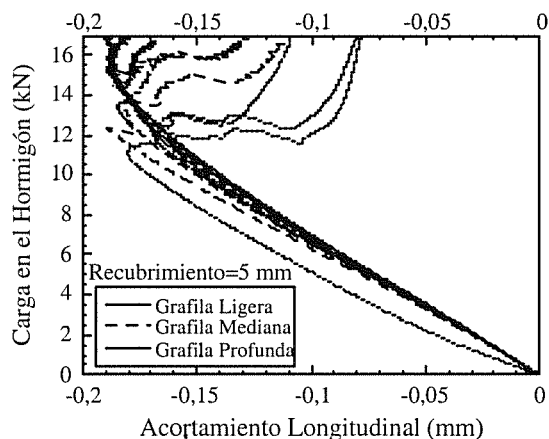


Figura 6. Curvas experimentales de la carga transferida al hormigón frente al acortamiento longitudinal de la probeta, en probetas con recubrimiento de 5 mm.

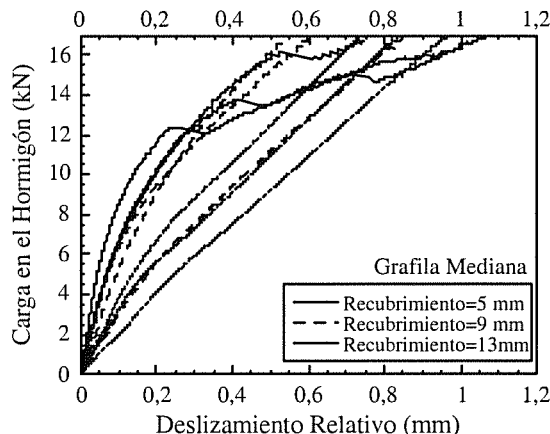


Figura 8b. Curvas experimentales de la carga transferida al hormigón frente al deslizamiento del alambre en la cara superior de la probeta, en probetas con alambre de grafila mediana.

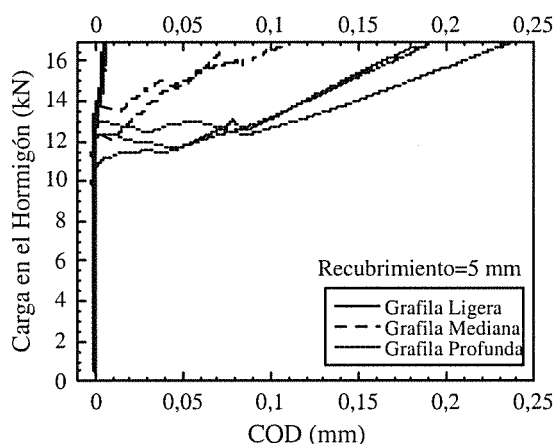


Figura 7. Curvas experimentales de la carga transferida al hormigón frente a la apertura de las grietas longitudinales; medidas en la cara superior del prisma de hormigón, en probetas con recubrimiento de 5 mm.

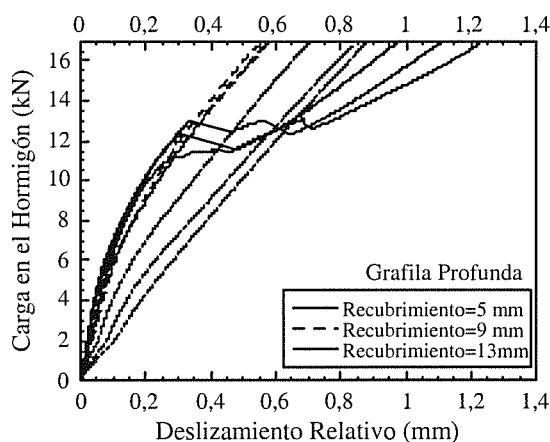


Figura 8c. Curvas experimentales de la carga transferida al hormigón frente al deslizamiento del alambre en la cara superior de la probeta, en probetas con alambre de grafila profunda.

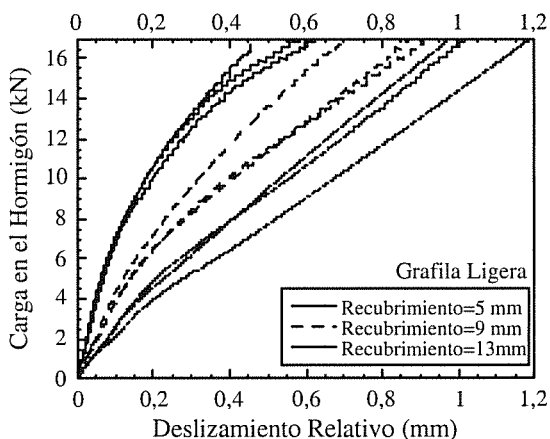


Figura 8a. Curvas experimentales de la carga transferida al hormigón frente al deslizamiento del alambre en la cara superior de la probeta, en probetas con alambre de grafila ligera.

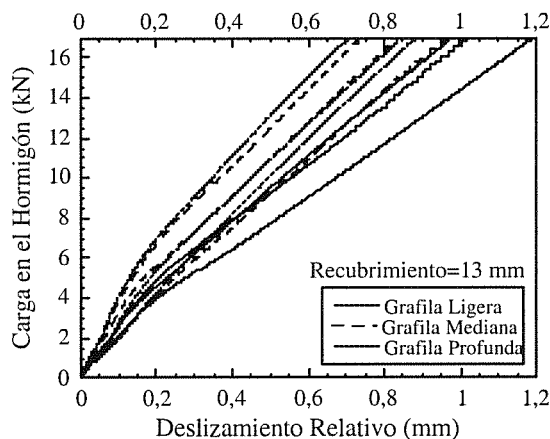


Figura 9. Curvas experimentales de la carga transferida al hormigón frente al deslizamiento del alambre en la cara superior de la probeta, en probetas con recubrimiento de 13 mm.

confirma de nuevo una mejor adherencia entre el alambre y el hormigón, siempre y cuando no aparezca una grieta longitudinal, como es el caso de las probetas con el menor recubrimiento. Además, en todas las curvas se aprecia un cambio de pendiente, aproximadamente para 0.10 a 0.15 mm de deslizamiento relativo, puede ser debido a la rotura de la adhesión entre el acero y el hormigón.

Los registros experimentales de la carga transferida al hormigón frente a la penetración del alambre en la cara inferior de las probetas son prácticamente iguales a las presentadas de la cara superior.

5. COMENTARIOS FINALES

Se ha presentado un ensayo que permite estudiar el agrietamiento longitudinal del hormigón durante la transferencia de la fuerza de pretensado en viguetas pretensadas. De los ensayos realizados en 27 probetas pretensadas con 3 recubrimientos y 3 profundidades de grafila, se pueden hacer los siguientes comentarios:

- a) El agrietamiento longitudinal del hormigón se manifiesta claramente en las probetas con menor recubrimiento por una disminución del acortamiento longitudinal de la probeta a partir de una cierta fuerza de pretensado transferida. Esta fuerza de pretensado crítica es menor cuanto mayor es la profundidad de la grafila en el alambre de pretensado.
- b) La medida de la apertura de la grieta longitudinal ha permitido confirmar la aparición de dicha grieta durante el proceso de transferencia de la fuerza de pretensado y medir exactamente la fuerza de pretensado transferida que agrieta el hormigón. Además, se ha comprobado experimentalmente que cuanto mayor es la profundidad de grafila mayor es la apertura de la grieta longitudinal.
- c) Una mayor profundidad de grafila conduce a una mejor adherencia entre el hormigón y el acero, manifestada en un menor deslizamiento relativo y en un mayor acortamiento del prisma de hormigón para una misma fuerza de pretensado transferida. Sin embargo, debe tenerse presente que la mayor profundidad de grafila favorece el agrietamiento longitudinal del hormigón y aumenta la apertura de las grietas longitudinales.
- d) Los resultados experimentales presentados permiten verificar los modelos analíticos y numéricos que se desarrollen para modelizar la interacción entre el hormigón y el acero, contemplando el agrietamiento longitudinal del hormigón durante el proceso de transferencia de la fuerza de pretensado.

6. REFERENCIAS

- [1] Calavera J. "Cálculo, construcción y patología de forjados de edificación", 4ª Ed., INTEMAC (1989).
- [2] Páez A. "El hormigón pretensado", Ed. Bellisco (1989).
- [3] A.C.I. Committee 318 "Building code requirements for reinforced concrete" (ACI 318/89) and "Commentary" (ACI 318R-89), American Concrete Institute, Detroit (1989).
- [4] Holmberg A. y Lindgren S. "Anchorage and prestress in pretensioned concrete", National Swedish Building Research. Document D1/1970 (1970).
- [5] Base G.D. "An investigation of transmission length in pretensioned concrete", Research Report 5, Cement and Concrete Association (1958).
- [6] Hanson H. y Kaar P.H. "Flexural bond tests of pretensioned prestressed concrete". ACI Journal 55, 783-803 (1959).
- [7] Tepfers R. "A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars", Chalmers University of Technology, Division of Concrete Structures 73:2, Goteborg, Sweden, (1973).
- [8] Tork B., Gálvez J.C., Planas J. y Elices M. "Fisuración longitudinal de elementos pretensados durante la transferencia de la fuerza de pretensado: I. Parte experimental", Hormigón y Acero (en prensa) (1999).

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa EMESA-TREFILERÍA S.A. la financiación de este trabajo y el suministro de los alambres de pretensado, y en especial a su Director de Calidad, D. Luis del Pozo, las acertadas indicaciones y comentarios realizadas durante el desarrollo de este trabajo. También agradecen a las empresas Portland-Valderribas y FETASA el suministro de cemento y de la pintura de sellado, respectivamente. Además agradecen al Ministerio de Educación y Cultura y a la Universidad Politécnica de Madrid las ayudas PB97-0579, MAT97-1022 e I+D 14.989.